

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ТРАВЛЕНИИ КОНСОЛЬНО ЗАКРЕПЛЕННОГО ОБРАЗЦА

Ю.В. БЕЛОУСОВ, канд. техн. наук, доцент

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

В статье рассмотрен экспериментально-теоретический метод определения технологических поверхностных остаточных напряжений с применением послойного травления консольно-закрепленного образца. Разработана методика расчета остаточных напряжений в поверхностных слоях материала. Показано, что предлагаемая методика расчета значительно проще по сравнению с известной и в большей степени соответствует классической, где используется образец с двумя опертыми краями.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: остаточные напряжения, прогиб, послойное травление, консольно-закрепленный образец.

При изготовлении деталей в их поверхностных слоях возникают остаточные напряжения. Значительные остаточные напряжения возникают после механической обработки поверхностей различных форм: точения, фрезерования, шлифования и др. Их появление связано с силовым и тепловым воздействием инструмента, что приводит к большим силовым и температурным градиентам в зоне обработки. Так, при точении растягивающие остаточные напряжения могут составлять 300...600 МПа при глубине залегания 0,1...0,2 мм, а максимальные температуры в зоне резания – 500...800°C.

Величина остаточных напряжений является важным параметром, определяющим качество изделий, влияет на работоспособность и долговечность деталей, что особенно важно при работе в условиях знакопеременных и динамических нагрузок. Поэтому большое значение имеет точность определения остаточных напряжений. Для определения остаточных напряжений в поверхностных слоях деталей (напряжений первого рода) обычно используется метод, состоящий в постепенном снятии тонких слоев материала с поверхности образца, при котором замеряется его прогиб и остаточная толщина. Затем по известным зависи-

мостям рассчитывают остаточные напряжения в слоях от поверхности вглубь материала [1].

Одним из экспериментально-теоретических методов определения остаточных напряжений является метод травления консольно-закрепленного образца прямоугольного поперечного сечения, который вырезается из исследуемой детали [2]. Здесь при снятии тонких поверхностных слоев материала толщиной δ_i измеряют прогиб f_i и остаточную толщину образца h_i (рис. 1). Однако методика расчета остаточных напряжений в данном случае довольно сложна и недостаточно точна.

Так в работе [3] для расчета остаточных напряжений в консольно-закрепленном образце получена формула

$$\sigma_{\text{ост}} = \frac{E}{3l^2} \left[\frac{h_i^2 f_i}{\delta_i} - \sum_1^i (h_{i-1} f_{i-1}) - 3h_{i-1} \sum_1^i f_{i-1} \right]. \quad (1)$$

При ее выводе предполагалось, что образец деформируется в результате прямого изгиба и растяжения, а при определении напряжений в i -м слое необходимо учитывать напряжения изгиба и растяжения, вызванные снятием всех предыдущих слоев.

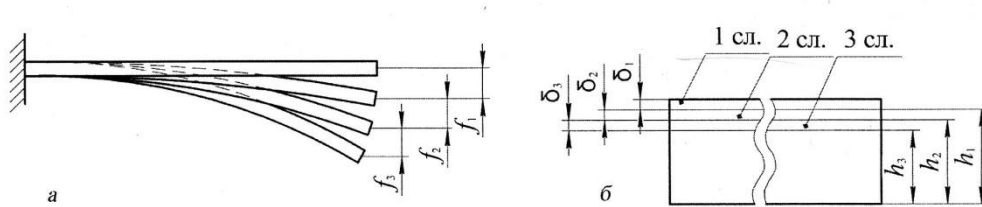


Рис. 1. Геометрические параметры, измеряемые при травлении консольно-закрепленного образца: *a* – приращение прогиба образца при снятии поверхностных слоев; *б* – изменение толщины образца.

После вырезки из детали длинного узкого образца напряженное состояние в нем становится одноосным с направлением остаточных напряжений вдоль образца. Эти напряжения постоянны по длине образца и различны по его толщине.

Неизвестные остаточные напряжения на поверхности образца $\sigma_{\text{ост}}$ считаем положительными. Удаление тонкого слоя толщиной δ с образца толщиной h вызовет деформацию остальной его части, которая была бы вызвана внецентренным приложением силы $F = \sigma_{\text{ост}} b \delta$, где b – ширина образца. После удаления тонкого слоя ось образца получит удлинение и кривизну.

Рассмотрим изгиб образца, выполненного в виде тонкого длинного стержня под действием нагрузки, приложенной с эксцентриситетом e (рис. 2). Предположим, что эксцентриситет имеется в плоскости симметрии. Тогда изгиб будет происходить в той же продольной плоскости xv , в которой действует сила F . Изгибающий момент в каком либо поперечном сечении mn будет

$$M = -F(e - f + y).$$

Момент имеет знак минус, так как при данном направлении осей стержень изогнется выпуклостью вверх.

Используя приближенное дифференциальное уравнение изогнутой оси балки, получим

$$EJ_z y'' = -F(e - f + y).$$

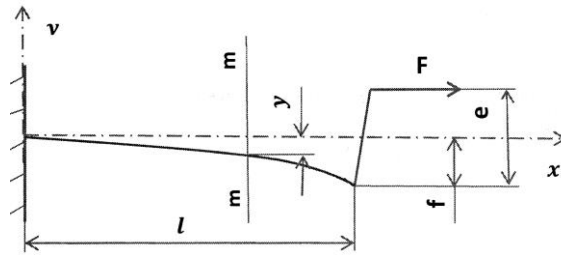


Рис. 2 Расчетная схема нагружения образца.

Введем обозначение $F/EJ_z = p^2$. Тогда

$$y'' + p^2 y = p^2(f - e).$$

Решением данного уравнения является уравнение

$$y = C_1 \sin px + C_2 \cos px + f - e.$$

Из граничных условий $(y)_{x=0} = 0$ и $(y')_{x=0} = 0$ находим $C_1 = 0$;
 $C_2 = e - f$. Тогда уравнение изогнутой оси стержня примет следующий вид

$$y = (e - f)(\cos px - 1).$$

Чтобы получить прогиб на правом конце стержня подставим $y = f$ и $x = l$:

$$f = (e - f)(\cos pl - 1).$$

Откуда
$$f = \frac{e(\cos pl - 1)}{\cos pl} \quad (f < 0).$$

При больших остаточных напряжениях в поверхностном слое величина $\cos pl$ не мала по сравнению с единицей. Стержень является гибким. Его прогиб не пропорционален силе F . Тогда

$$pl = \arccos\left(\frac{e}{e-f}\right) \quad \text{и} \quad p = \frac{1}{l} \arccos\left(\frac{e}{e-f}\right) = \sqrt{\frac{F}{EJ_z}}.$$

Откуда

$$F = \left[\arccos\left(\frac{e}{e-f}\right) \right]^2 \frac{EJ_z}{l^2}.$$

Поскольку $J_z = \frac{b(h-\delta)^3}{12}$, то $\sigma_{ост} = \left[\arccos\left(\frac{e}{e-f}\right) \right]^2 \frac{E(h-\delta)^3}{12\delta l^2}$.

При удалении с образца первого слоя

$$\frac{e_1}{e_1 - f_1} = \frac{h_1}{h_1 - 2f_1}$$

и

$$\sigma_{1ост} = \left[\arccos\left(\frac{h_1}{h_1 - 2f_1}\right) \right]^2 \frac{E h_1^3}{12\delta_1 l^2}. \quad (2)$$

После снятия первого слоя стержень изогнется. В его поверхностном слое кроме остаточных появятся дополнительные напряжения, вызванные его изгибом. Поэтому удаление второго слоя толщиной δ_2 вызовет деформацию, вызванную внецентренным приложением силы $F_2 = F_{2ост} + F_{2доп}$, где $F_{2ост} = \sigma_{2ост} b \delta_2$ – сила, вызванная равномерно распределенными во втором слое остаточными напряжениями, а $F_{2доп} = \sigma_{2доп} b \delta_2$ – сила от действия дополнительных напряжений, вызванных изгибом образца в результате снятия с него первого слоя.

Напряжения $\sigma_{2доп}$ могут быть определены по формуле

$$\sigma_{2доп} = \frac{3F_1(h_1 - 2f_1 + 2y)}{b h_1^2},$$

Напряжение $\sigma_{2\text{доп}}$ зависит от прогибов образца y , которые по его длине изменяются от 0 до f_1 . Тогда

$$F_{2\text{доп}}f_1 = \int_0^{f_1} \sigma_{2\text{доп}}(y)b \delta_2 dy = \int_0^{f_1} \frac{3F_1(h_1 - 2f_1 + 2y)\delta_2}{h_1^2} dy.$$

Откуда

$$F_{2\text{доп}} = \frac{3\sigma_{1\text{ост}}b\delta_1\delta_2(h_1 - f_1)}{h_1^2}, \quad (3)$$

а
$$F_2 = \sigma_{2\text{ост}}b\delta_2 + \frac{3\sigma_{1\text{ост}}b\delta_1\delta_2(h_1 - f_1)}{h_1^2}. \quad (4)$$

Поскольку

$$F_2 = \left[\arccos\left(\frac{h_2}{h_2 - 2f_2}\right) \right]^2 \frac{Eb h_2^3}{12l^2},$$

то
$$\sigma_{2\text{ост}} = \left[\arccos\left(\frac{h_2}{h_2 - 2f_2}\right) \right]^2 \frac{E h_2^3}{12\delta_2 l^2} - \frac{3\sigma_{1\text{ост}}\delta_1(h_1 - f_1)}{h_1^2}. \quad (5)$$

Аналогично можно получить:

$$\sigma_{3\text{ост}} = \left[\arccos\left(\frac{h_3}{h_3 - 2f_3}\right) \right]^2 \frac{E h_3^3}{12\delta_3 l^2} - \frac{3\sigma_{2\text{ост}}\delta_2(h_2 - f_2)}{h_2^2}. \quad (6)$$

Тогда общая формула для определения остаточных напряжений в i – м слое будет иметь следующий вид:

$$\sigma_{i\text{ост}} = \left[\arccos\left(\frac{h_i}{h_i - 2f_i}\right) \right]^2 \frac{E h_i^3}{12\delta_i l^2} - \frac{3\sigma_{i-1\text{ост}}\delta_{i-1}(h_{i-1} - f_{i-1})}{h_{i-1}^2}. \quad (7)$$

Для иллюстрации разработанной методики выполнен расчет остаточных напряжений в образцах прямоугольного сечения по данным работы [3]. Образцы вырезали из заготовки жаропрочной стали с модулем упругости $E = 2,2 \cdot 10^5$ МПа. Размеры образцов: длина рабочей части $l = 80$ мм, начальная толщина $h = 2,5$ мм, ширина $b = 10$ мм. Послойное травление выполняли в электролите. Геометрические параметры измеряли с помощью цифрового индикатора. Там же выполнен расчет остаточных напряжений в соответствии с классической методикой, где используется образец с двумя опертыми краями, а толщину и прогиб измеряют в средней части образца.

Классическим методом испытывались образцы той же геометрии и вырезанные из той же заготовки. Слои также снимались химическим травлением. После снятия каждого слоя измерялись толщина h_i и прогиб f_i в средней части образца. Результаты измерения и расчета по классической методике, методике работы [3], а также по предлагаемой методике приведены на рис. 3. Как видно из рисунка, расчет остаточных напряжений при травлении консольно-закрепленного образца по предлагаемой методике в большей степени соответствует классической и позволяет с большей точностью определять градиент напряжений по толщине образца. В отличие от существующей методики, здесь при определении напряжений в i – м слое нет необходимости учитывать напряжения, вызванные снятием всех предыдущих слоев. Учитываются только напряжения при снятии предыдущего и последующего слоев.

Следует заметить, что второе слагаемое в формуле (7) сильно зависит от толщины снимаемого слоя. При толщине снимаемого слоя до двадцати микрометров его доля сравнительно невелика и не превышает 2%. При увеличении толщины доля второго слагаемого может достигать до 8%. Поэтому остаточные

напряжения в удаляемом слое материала можно вычислить непосредственно через параметры только этого слоя, используя следующую формулу:

$$\sigma_{i_{ост}} = (0,92 \dots 0,98) \left[\arccos\left(\frac{h_i}{h_i - 2f_i}\right) \right]^2 \frac{E h_i^3}{12 \delta_i l^2} \quad (8)$$

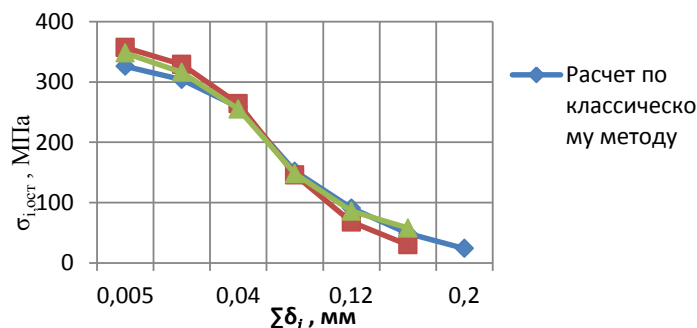


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений по толщине образца ($\Sigma \sigma_i$ – суммарная толщина снятого слоя).

В формуле (8) значение числового коэффициента в скобках зависит от толщины снимаемого слоя. При малых толщинах – большее значение, при больших – меньшее. Если удаляется слой порядка нескольких микрометров, то вторым слагаемым можно вовсе пренебречь. Это может значительно упростить расчеты.

Л и т е р а т у р а

1. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: Справочник. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.
2. Петров В.В., Петряев А.И., Вяземский М.К. А.с. 242466 СССР. Устройство для определения остаточных напряжений. БИ № 15 1969; опубл. 25.04.1969.
3. Олейник Б.Д., Винокуров Н.В., Нуртдинов А.С. Определение остаточных поверхностных напряжений методом травления консольно-закрепленного образца// Деформация и разрушение материалов. – 2015. – № 4. – С.12-16..
4. Hoffman N.P., Stolz U. Ontransient growth of wear pattern properties// Wear. –2010. – Vol. 268. – № 7-8. – P. 886-892.

References

1. Birger, I.A., Shorr, B.F., Iosilevich, G.B. (1993). *Raschet na Prochnost Detalej Mashin: Spravochnik*, the 4th izd., pererab. i dop., Moscow: Mashinostroenie, 640 p.
2. . Petrov, V.V., Petryaev, A.I., Vyazemskij, M.K. (1969). A.s. 242466 SSSR. *Ustrojstvo dlya opredeleniya ostatochnyh napryazhenij*, BI № 15, opubl. 25.04.1969.
3. Olejnik, B.D., Vinokurov, N. V., Nurtidinov, A.S. (2015) *Opredelenie ostatochnyh poverhnostnyh napryazhenij metodom travleniya konsolno-zakreplennogo obraztsa, Deformatsiya i Razrushenie Materialov*, № 4, p. 12-16.
4. Hoffman, N.P., Stolz, U. (2010). Ontransient growth of wear pattern properties, *Wear*, Vol. 268. №7-8, p. 886-892.

DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES BY ETCHING CANTILEVERED SAMPLE

Yu.V. Belousov

Moscow State Technical University after N. Bauman, Russia

The article describes experimental-theoretical method of determining technological surface residual stresses with application of layer-by-layer etching of the cantilever-fixed sample. The developed method of calculation of residual stresses in the surface layers of the material. It is shown that the proposed calculation method is more sensitive compared to the known and practically coincides with the classic, which uses sample with two simply supported edges.

KEY WORDS: residual stresses, deflection, layer-by-layer etching, the console-fixed sample.